

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
**Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

Stif  
C. B. Bann  
1-8-02

612.40181X00

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s): DURET, et al.  
Serial No.: (Not yet assigned)  
Filed: May 10, 2001  
Title: AUTOMATIC PIPE GRIDGING METHOD ALLOWING  
IMPLEMENTATION OR FLOW MODELLING CODES  
Group: (Not yet assigned)



LETTER CLAIMING RIGHT OF PRIORITY

Honorable Commissioner of  
Patents and Trademarks  
Washington, D.C. 20231

June 19, 2001

Sir:

Under the provisions of 35 USC 119 and 37 CFR 1.55, the  
applicant(s) hereby claim(s) the right of priority based on  
French Patent Application No.(s) 00/08200, filed June 23,  
2000.

A certified copy of said French Application is attached.

Respectfully submitted,

ANTONELLI, TERRY, STOUT & KRAUS, LLP

Donald E. Stout  
Registration No. 26,422

DES/alb  
Attachment  
(703)312-6600

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



3

Jc903 U.S. PTO  
09/883402

# BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 28 MAI 2001

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

SIEGE  
26 bis, rue de Saint Petersburg  
75800 PARIS cedex 08  
Téléphone : 01 53 04 53 04  
Télécopie : 01 42 93 59 30  
<http://www.inpi.fr>


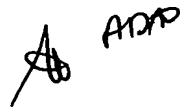
**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE 1/2

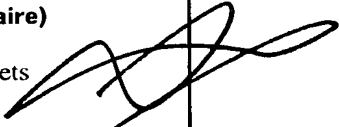
Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 W / 260899

<b>REMISE DES PIÈCES</b> DATE <b>23.06.00</b> LIEU <b>99</b> N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI <b>0008200</b> DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉ PAR L'INPI <b>25 JUIN 2000</b>		<b>1</b> NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE 1 et 4 avenue de Bois Préau 92852 Rueil Malmaison cedex	
<b>Vos références pour ce dossier</b> (facultatif) JC/CLN			
<b>Confirmation d'un dépôt par télécopie</b> <input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie			
<b>2 NATURE DE LA DEMANDE</b>		<b>Cochez l'une des 4 cases suivantes</b>	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
<i>Demande de brevet initiale</i> <i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i>		N° _____ Date ____/____/____ N° _____ Date ____/____/____	
Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i>		<input type="checkbox"/> N° _____ Date ____/____/____	
<b>3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)</b> METHODE DE MAILLAGE AUTOMATIQUE DE CONDUITES PERMETTANT L'IMPLEMENTATION DE CODES DE MODELISATION DE FLUX			
<b>4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE</b>		Pays ou organisation _____ N° _____ Date ____/____/____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date ____/____/____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
<b>5 DEMANDEUR</b>		<input type="checkbox"/> S'il y a d'autres demandeurs, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
Nom ou dénomination sociale		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE	
Prénoms			
Forme juridique		Organisme Professionnel	
N° SIREN			
Code APE-NAF			
Adresse	Rue	1 & 4 avenue de Bois Préau	
	Code postal et ville	92852	Rueil Malmaison cedex
Pays		France	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00	
N° de télécopie (facultatif)		01 47 50 70 03	
Adresse électronique (facultatif)			

REMISE DES PIÈCES DATE 23.08.00 LIEU 99 N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI 0008 200		Réservé à l'INPI	
Vos références pour ce dossier : (facultatif)		JC/CLN	
<b>6 MANDATAIRE</b>			
Nom		ELMALEH	
Prénom		Alfred	
Cabinet ou Société		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE	
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel			
Adresse	Rue	1 & 4 avenue de Bois Préau	
	Code postal et ville	92852	Rueil Malmaison cedex
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00	
N° de télécopie (facultatif)		01 47 52 70 03	
Adresse électronique (facultatif)			
<b>7 INVENTEUR (S)</b>			
Les inventeurs sont les demandeurs		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Dans ce cas fournir une désignation d'inventeur(s) séparée	
<b>8 RAPPORT DE RECHERCHE</b>		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)	
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Paiement échelonné de la redevance		Paiement en deux versements, uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non	
<b>9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Requête antérieurement à ce dépôt (joindre une copie de la décision d'admission pour cette invention ou indiquer sa référence) :	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes			
<b>10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> (Nom et qualité du signataire) Alfred ELMALEH, Chef du Département Brevets N° 422-5/PP.253		<b>VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI</b>  	



<b>Vos références pour ce dossier</b> (facultatif)		JC/CLN	
<b>N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL</b>		000 8200	
<b>TITRE DE L'INVENTION</b> (200 caractères ou espaces maximum) METHODE DE MAILLAGE AUTOMATIQUE DE CONDUITES PERMETTANT L'IMPLEMENTATION DE CODES DE MODELISATION DE FLUX			
<b>LE(S) DEMANDEUR(S) :</b> INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE			
<b>DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :</b> (Indiquez en haut à droite «Page N° 1/1» S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez un formulaire identique et numérotez chaque page en indiquant le nombre total de pages).			
<b>Nom</b>		DURET	
<b>Prénoms</b>		Emmanuel	
<b>Adresse</b>	<b>Rue</b>	8 rue Isabey	
	<b>Code postal et ville</b>	92500	Rueil Malmaison
<b>Société d'appartenance (facultatif)</b>			
<b>Nom</b>		FAILLE	
<b>Prénoms</b>		Isabelle	
<b>Adresse</b>	<b>Rue</b>	1 Le Val Eglantine	
	<b>Code postal et ville</b>	78240	Carrière su Seine
<b>Société d'appartenance (facultatif)</b>			
<b>Nom</b>		HEINTZE	
<b>Prénoms</b>		Eric	
<b>Adresse</b>	<b>Rue</b>	3 rue du Progrès	
	<b>Code postal et ville</b>	92190	Meudon
<b>Société d'appartenance (facultatif)</b>			
<b>DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)</b> Alfred ELMALEH, Chef du Département Brevets N° 422-5/PP.253			

## DOCUMENT COMPORTANT DES MODIFICATIONS

PAGE(S) DE LA DESCRIPTION OU DES REVENDEICATIONS OU PLANCHE(S) DE DESSIN			R.M.*	DATE DE LA CORRESPONDANCE	TAMPON DATEUR DU CORRECTEUR
Modifiée(s)	Supprimée(s)	Ajoutée(s)			
17			X	03/10/00	09/10/00

Un changement apporté à la rédaction des revendications d'origine, sauf si celui-ci découle des dispositions de l'article R.612-36 du code de la Propriété Intellectuelle, est signalé par la mention «R.M.» (revendications modifiées).

La présente invention concerne une méthode de maillage automatique de conduites permettant l'implémentation de codes de modélisation de fluides acheminés par ces conduites.

5 La méthode selon l'invention trouve des applications dans de nombreux domaines. On peut notamment l'utiliser dans le domaine de la production d'hydrocarbures pour l'implémentation de codes de simulation d'écoulements polyphasiques dans des conduites pétrolières depuis des sites de production jusqu'à des sites de destination.

10 Le maillage obtenu par la méthode peut être utilisé notamment pour l'implémentation du code de modélisation TACITE (marque déposée) destiné à simuler des écoulements permanents ou transitoires d'hydrocarbures dans des conduites. Différents algorithmes permettant de conduire la simulation des écoulements suivant le code TACITE ont fait l'objet des brevets US 5 550 761,  
15 FR 2 756 044 et FR 2 756 045 (US 5 960 187).

Les modes d'écoulement de fluides polyphasiques dans des tubes sont extrêmement variés et complexes. Les écoulements diphasiques, par exemple, peuvent être stratifiés, la phase liquide s'écoulant dans la partie inférieure de la conduite, ou intermittents avec une succession de bouchons liquides et gazeux, ou  
20 bien encore dispersés, le liquide étant entraîné sous forme de fines gouttelettes. Le mode d'écoulement varie notamment avec l'inclinaison des conduites par rapport à l'horizontale et il dépend du débit de la phase gazeuse, de la température etc. Le glissement entre les phases qui varie selon que l'on considère les tronçons de conduite ascendants ou descendants, entraîne des variations de pression sans qu'il y  
25 ait toujours compensation. Les caractéristiques du réseau d'écoulement (dimensionnement, pression, débit de gaz, etc.) doivent être déterminées avec soin.

Le code de simulation TACITE prend en compte un certain nombre de paramètres influant directement sur la physique du problème à traiter. Parmi ceux-ci, on trouve les propriétés des fluides et des modes d'écoulement, les variations topographiques (variations de longueurs, d'inclinaison, de diamètre etc.), la rugosité  
 5 éventuelle des conduites, ses propriétés thermiques (nombre de couches d'isolant et leur nature) ou encore la disposition d'équipements le long de la conduite (pompes, injecteurs, séparateurs, etc.) qui entraînent des changements de flux physique.

### **Etat de la technique**

Le maillage d'un domaine physique est une étape primordiale lors d'une  
 10 simulation numérique. De sa qualité dépendent la validité des résultats et les temps de calcul. Il est donc fondamental de fournir au code un maillage correct avant de commencer une simulation. On juge généralement la qualité d'un maillage à sa capacité à bien décrire les phénomènes physiques sans que la simulation ne prenne trop de temps, si bien qu'il existe toujours un maillage optimal pour chaque problème  
 15 étudié. Un maillage inadapté peut conduire, dans l'exécution du schéma numérique qui régit la simulation, à des erreurs difficilement détectables, du moins au premier abord, voire même rendre le calcul impossible et stopper l'exécution du code, s'il est par trop aberrant. Les utilisateurs des codes n'ont pas forcément une expérience suffisante en analyse numérique pour la réalisation d'un maillage correct, susceptible  
 20 de rendre réellement compte des phénomènes physiques que l'on veut étudier.

La topographie d'une conduite cylindrique peut être assimilée à une succession de segments de droites reliant des points successifs. En coordonnées cartésiennes, deux points successifs de la conduite sur ses portions verticales (montantes ou descendantes) peuvent avoir même abscisse (courbe A sur la Fig.1). Il  
 25 est bien préférable de ce fait de représenter l'élévation de chaque point en fonction de son abscisse curviligne le long de la conduite. Avec ce mode de représentation, des points successifs de la conduite d'élévations différentes ont forcément deux abscisses curvilignes distinctes et la pente des tronçons de conduite est au plus égale à  $45^\circ$  par

rapport a l'horizontale (cas des tronçons montants ou descendants absolument verticaux courbe B de la Fig.1). A une abscisse correspond toujours une ordonnée et une seule.

Avec un peu de sens physique, certaines erreurs de maillage peuvent être évitées. Aux endroits de la conduite susceptibles de connaître de grandes variations des paramètres physiques si on est en mesure de les prévoir, on peut imposer un maillage plus fin qu'ailleurs. Ainsi, on effectue moins de calculs à chaque pas de temps, tout en conservant la finesse souhaitée aux endroits importants. Mais, dans l'optique d'obtenir une solution continue, le passage d'une maille fine a une maille plus grossière doit, lui aussi, être continu.

La Fig.2a montre par exemple une portion de conduite en W d'une longueur de 2 km comprenant quatre tronçons de 500 m. Si on discrétise une telle conduite par des mailles à pas de 40 m constant du début à la fin, on laisse de côté les points importants du tracé à 500 m et 1500 m. La simulation ne permettra pas de rendre compte correctement de l'accumulation de liquide à ces point bas de la topographie. Plus important encore, le calcul est faussé par le fait qu'on ait remplacé les angles du W par des segments de droites horizontaux (Fig. 2b). Les phénomènes physiques ne seront pas ceux recherchés.

La méthode selon l'invention permet d'obtenir automatiquement un maillage ou discrétisation d'une conduite tenant compte au mieux de la topographie et des paramètres physiques affectant la physique des écoulements, soumis aux contraintes suivantes :

- 1 - Assurer la convergence du calcul ;
- 2 - Représenter au mieux les accumulations importantes de liquide dans les points bas de la conduite ;
- 3 - Placer les équipements sur un bord de maille ;
- 4 - Imposer à deux mailles consécutives d'avoir le même ordre de longueur ;
- 5 - Respecter la longueur totale de la conduite ;

- 6 - Limiter le nombre de mailles au minimum possible en respectant les contraintes précédentes, pour ne pas trop pénaliser la simulation avec le temps de calcul.

Le respect des six contraintes précédentes n'est pas une tâche aisée, mais il est le passage obligé pour éviter de mailler la conduite étudiée de façon homogène, sans se soucier de la physique du problème, comme le font la plupart des mailleurs automatiques.

Pour limiter le nombre de mailles, il faut chercher, si cela est possible, à simplifier la topographie pour ne retenir que les seules zones de la conduite où se trouvent les variations significatives du profil susceptibles d'intervenir de façon significative sur les phénomènes physiques.

### **La méthode selon l'invention**

La méthode selon l'invention permet de mailler automatiquement une conduite 1D présentant sur toute sa longueur une topographie ou profil quelconque dans le but de faciliter l'implémentation de codes de modélisation de flux. Le maillage obtenu par la méthode présente une répartition de mailles de dimensions variables, appropriée pour tenir compte au mieux de la physique des écoulements.

La méthode est caractérisée en ce que, ayant défini une taille minimale de maille et une taille maximale de maille, on subdivise la conduite en tronçons délimités par des coudes, on positionne une maille de taille minimale de part et d'autre de chaque coude, on positionne des grandes mailles de taille au plus égale à la taille maximale dans la portion centrale de chaque tronçon, et on répartit des mailles de tailles croissantes ou décroissantes sur les portions intermédiaires de chaque tronçon entre chaque maille de taille minimale et la portion centrale.

La répartition des mailles de tailles croissantes ou décroissantes sur les portions de chaque tronçon intermédiaire entre chaque maille de taille minimale et la portion centrale, est obtenue par exemple en déterminant les points d'intersection

avec chaque tronçon de conduite, d'un faisceau de droites concourant en un point et formant entre elles un angle constant.

On détermine par exemple la position du sommet du faisceau de droites sur un axe passant par un coude de la conduite et perpendiculaire à chaque tronçon, à une distance de celui-ci qui est fonction de la taille des mailles extrêmes de chaque portion intermédiaire et de leur écart.

Le positionnement automatique des mailles avec des mailles plus petites au voisinage des extrémités de chaque tronçon permet d'apporter un plus grand soin à la modélisation des phénomènes dans les portions de conduite présentant des changements de direction (infléchissement ou coude).

La méthode selon l'invention comporte de préférence une simplification préalable de la topographie de la conduite de façon que le nombre total de mailles du maillage de la conduite permettent une modélisation réaliste de la physique des phénomènes dans un temps fixé.

Suivant un premier mode d'implémentation, la méthode comporte une représentation de la conduite sous la forme d'un graphe reliant l'abscisse curviligne et la variation de niveau, et une simplification du nombre de tronçons a) en affectant à chaque point entre deux tronçons successifs un poids prenant en compte la longueur des tronçons et leurs pentes respectives, b) en sélectionnant parmi les points rangés par ordre de poids croissant ou décroissant, ceux dont le poids est le plus élevé, la topographie simplifiée étant celle du graphe passant par les points sélectionnés.

La sélection des points de la conduite dont le poids est le plus élevé est obtenue par exemple en repérant dans le rangement de points une discontinuité de poids supérieure à un certain seuil fixé.

Suivant un autre mode d'implémentation, la méthode comporte une représentation de la conduite sous la forme d'un graphe reliant l'abscisse curviligne

et la variation de niveau, et une simplification du nombre de tronçons par a) la formation du spectre de fréquence de la courbe représentative de la topographie de la conduite, b) l'atténuation des plus hautes fréquences du spectre traduisant les plus petites variations de topographie et c) la reconstruction d'une topographie simplifiée  
5 correspondant au spectre de fréquence rectifié.

La sélection est effectuée par exemple par a) un échantillonnage de la courbe représentative de la topographie de la conduite avec un pas d'échantillonnage choisi pour que le plus petit tronçon de la conduite contienne au moins deux pas d'échantillonnage, b) une détermination du spectre de fréquence de la courbe  
10 échantillonnée par application, c) une correction du spectre par filtrage passe-bas dont la fréquence de coupure est choisie en fonction d'un nombre de mailles maximal fixé pour subdiviser la conduite, et, d) une détermination de la topographie correspondant au spectre de fréquence rectifié.

Les deux modes de simplification automatique précédents peuvent être  
15 appliqués indépendamment l'un de l'autre ou bien successivement, le second mode étant appliqué de préférence quand le premier mode ne permet pas de simplification notable de la topographie.

### **Présentation sommaire des figures**

D'autres caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention,  
20 apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'exemples non limitatifs de réalisation, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre deux modes de représentation schématique de la topographie d'une conduite ;
- les Fig.2a, 2b montrent respectivement la topographie schématique d'une  
25 conduite en forme de W en coordonnées curvilignes, et une partie agrandie de cette même topographie ;



- la Fig. 3 montre un mode d'attribution de poids à un point de la topographie d'une conduite ;
- la Fig. 4 montre un exemple de spectre de poids ;
- la Fig. 5 montre un exemple d'arrangement des points par paliers de poids décroissants, permettant de repérer la position d'un seuil et de simplifier la topographie de la conduite ;
- la Fig. 6 montre un exemple de topographie d'une conduite marine comportant un « riser » à ses extrémités ;
- la Fig. 7 montre la topographie simplifiée de la même conduite, que l'on obtient par sélection des poids ;
- la Fig. 8 montre que, sans les « risers » terminaux, la forme générale de la même conduite est plus difficile à dégager ;
- la Fig. 9 montre un spectre de fréquence typique d'une conduite ;
- la Fig. 10 montre un exemple de tronçon de conduite avec une distribution de mailles de différentes tailles, les plus petites M1 étant positionnées aux coudes, les plus grandes, M2 étant placées dans le tiers central, les mailles intermédiaires M3 étant interposées et résultant d'une interpolation I entre les unes et les autres ;
- la Fig. 11 montre un mode de formation de mailles de tailles croissantes ;
- la Fig. 12 illustre le mode de découpage angulaire d'une portion intermédiaire sur un tronçon de conduite ; et
- la Fig. 13 montre le maillage obtenu par la mise en oeuvre de la méthode, sur une conduite sous-marine de 90km de longueur.

## DESCRIPTION DETAILLEE

### I) Simplification de la topographie d'une conduite

On n'a généralement aucune difficulté à faire ressortir au premier coup d'œil la forme globale d'un profil quelconque. La méthode selon l'invention permet, par des critères purement mathématiques, le repérage automatique de la configuration d'une conduite, en se basant sur une analyse spectrale de la courbe représentative des variations du profil. Parmi tous les spectres que l'on peut associer à une topographie donnée, on en recherche un qui permette de distinguer les portions du profil à simplifier et les portions du profil importantes.

#### 10 I-1) Premier mode de simplification

Dans une topographie, les seuls critères faisant en sorte qu'un point est simplifiable par rapport à un autre, ne peuvent être que les longueurs des sections qui l'entourent et la différence angulaire les séparant (Fig.3). Lorsqu'on construit les deux « spectres » (Indices du tronçon) - (Longueurs des tronçons) et (Abscisse curviligne des points) - (Différence angulaire des tronçons entrant et sortant), on se rend compte qu'ils présentent des différences notables d'ordres de grandeur mais également que ces deux spectres sont indépendants, si bien qu'en simplifiant des points négligeables dans l'un, il se peut qu'on ait effacé des points importants dans l'autre.

Pour regrouper ces deux spectres en un seul, on va affecter à chaque point topographique un poids prenant en compte les longueurs de tronçons, et les différences angulaires qui les séparent. On utilise par exemple la pondération suivante :

$$Poids = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} (P_2 - P_1)^2 \text{ où } L_1 \text{ et } L_2 \text{ sont les longueurs des tronçons, et}$$

$$P_1 = \frac{y_1}{x_1} \text{ et } P_2 = \frac{y_2}{x_2} \text{ sont les pentes. Ainsi, à longueurs égales, on simplifiera les}$$

tronçons séparés par la plus petite différence de pente. Et à angles égaux, on simplifiera les longueurs les plus courtes.

### Construction du spectre

Le spectre (Abscisse curviligne - Poids) présente dans la majorité des cas, une succession de pics de toutes tailles. Ces spectres tel celui de la Fig.4 ne sont généralement pas analysables directement. Dans ces conditions, la technique que l'on utilise ici consiste à classer les poids par ordre croissant ou décroissant et à leur affecter à chacun l'indice correspondant de classement par poids de 1 à N. De préférence, on utilise une représentation (Log Poids- Indice) qui fait mieux ressortir les ordres de grandeur car un saut de n sur un tel spectre signifie un rapport de  $10^n$  sur les poids. Tous les poids ayant le même ordre de grandeur sont classés sur des paliers plus ou moins horizontaux. Deux poids d'ordres de grandeur différents seront séparés par un segment de droite vertical. On aboutit à un spectre en cascade, permettant de lire aisément les différents ordres de grandeurs présents dans la topographie. Sur l'exemple de la Fig.5 par exemple, le spectre logarithmique contient deux paliers bien distincts séparés par un segment vertical.

On cherche le premier triplet de points consécutifs du spectre, défini par exemple par un seuil  $\Delta P$  fixé sur l'échelle logarithmique ( $\Delta P = 1$  par exemple) entre le deuxième et le troisième, qui suit un saut inférieur à  $\Delta P$  entre le premier et le deuxième. Les deux premiers points sont du même ordre de grandeur. Tous les points suivants sont d'un ordre de grandeur négligeable par rapport aux deux premiers. De cette façon, on s'assure que tous les poids à droite du triplet en question, seront au moins 10 fois inférieurs au poids du deuxième et donc négligeables par rapport aux points en amont. Sur la table de correspondance (indice de poids-abscisse curviligne), on sélectionne les points d'abscisse curviligne correspondant aux poids les plus forts sélectionnés. La topographie simplifiée sera la ligne passant par ces points.

Sur l'exemple de topographie de la Fig.6, on y distingue trois parties distinctes. Elle commence par un « riser » de 3 kms, suivi d'une partie horizontale en dents de scie sur 20 kms qui se termine par un autre « riser » de 200 m lui aussi en dents de scie. Son spectre est celui de la Fig.5. Le premier triplet qui obéit au critère de seuillage est formé par les points 4, 5 et 6. Le seuil de simplification est le point d'indice 6. Un saut supérieur à 2 dans l'échelle logarithmique sépare les paliers horizontaux de part et d'autre des points 5 et 6. Ainsi, on s'assure que les points à gauche de l'indice 5 ont des poids au moins 100 fois supérieurs à ceux qui se trouvent à droite de l'indice 6.

Dans cet exemple, on simplifie la topographie en ne gardant que les points d'abscisse curviligne correspondant aux poids supérieurs ou égaux à celui du point 6. On obtient la topographie simplifiée de la Fig.7. La forme globale est conservée. Toutes les petites variations en dents de scie sur la partie horizontale de 20 kms ont été supprimées. Le nombre de points est passé de 43 initialement (Fig.6) à 6, soit une réduction d'un facteur 7. Ce cas se prête particulièrement bien au seuillage, puisque les différents ordres de grandeurs sont visibles sur la topographie initiale.

Le premier mode de simplification qui vient d'être décrit est facile à mettre en œuvre et fondé sur des algorithmes relativement simples exécutables rapidement. Il est adapté aux topographies possédant plusieurs ordres de grandeurs, comme la topographie précédente qui a pu être considérablement simplifiée car elle contenait des points ayant des poids négligeables par rapport à d'autres.

Le problème est tout autre si on ne s'intéresse qu'à la partie centrale de cette topographie, en retirant les risers aux extrémités car dans ce cas, comme le montre la Fig.8, la forme générale de la conduite est plus difficile à dégager. La simplification de cette topographie par une droite reliant le point de départ et celui d'arrivée, n'est plus possible. Son spectre est exactement le même que celui de la topographie initiale, à ceci près qu'il commence au point 6. Aucun seuil n'est présent dans cette partie du spectre, les points ont tous le même ordre de grandeur. Et même si le poids

le plus élevé vaut plus de 100 fois le plus faible, on passe de l'un à l'autre de façon continue.

## **I-2) Deuxième mode de simplification**

5 Pour les topographies avec des points présentant le même ordre de grandeur, qui ne peuvent pas être traitées par la méthode de seuillage précédente, on procède à un filtrage spectral. Les petites variations dans le profil de la conduite se traduisent par des hautes fréquences dans le spectre de Fourier de la fonction représentative de la topographie. En coupant ou en atténuant les fréquences les plus hautes de son spectre de fréquence, il est possible de simplifier la topographie.

10 A cet effet, on échantillonne la fonction topographique et l'on détermine son spectre par la méthode dite FFT (Fast Fourier Transform). Le pas d'échantillonnage doit être assez petit pour bien rendre compte de toutes les plages de fréquence en évitant le repliement du spectre. Pour ce faire, le nombre de points d'échantillonnage est choisi de telle façon que le plus petit tronçon de conduite contienne au moins  
15 deux subdivisions pour s'assurer que la transformée de Fourier agira sur toutes les parties de la conduite, même les plus insignifiantes. L'atténuation des hautes fréquences doit bien entendu être effectuée avec discernement et ajustée de façon que la fonction topographique reconstituée reste représentative de la fonction initiale.

La méthode de filtrage la plus simple consiste par exemple à appliquer un  
20 seuil, tous les coefficients de Fourier inférieurs à ce seuil étant éliminés (coefficients inférieurs à 40 par exemple sur l'exemple de la Fig.9. Seule l'information contenue dans les fréquences inférieures à ce seuil est conservée. On reconstitue par transformée inverse la topographie simplifiée correspondante.

En se fixant une fréquence de coupure, on fixe ainsi le nombre maximal  
25 d'oscillations du signal reconstitué. Si l'on ne garde que les dix premières fréquences, la fonction reconstituée va suivre la forme générale de la conduite, avec un maximum de vingt extrema.

## II) Sélection des tailles de maille sur chaque tronçon de conduite

### Principe

Le principe du maillage va consister à mailler indépendamment les tronçons de conduite entre deux bords imposés. Comme l'intérêt d'un maillage bien fait est de pouvoir observer correctement les accumulations de liquide dans les coudes, il est  
 5 préférable que le maillage soit affiné aux points de la topographie susceptibles de voir s'accumuler du liquide ou du gaz. C'est pourquoi, on va s'arranger pour placer une maille courte avant et après chaque coude et des plus grandes entre les coudes. Par contre, il n'est pas utile de mailler finement les parties intermédiaires des  
 10 tronçons entre les coudes.

La topographie de la conduite ayant été au préalable (quand c'était nécessaire) simplifiée et réduite à un certain nombre de tronçons, on fixe pour les mailles une taille minimale et une taille maximale. On isole alors tout d'abord les bords de chacun d'eux (leur entrée, leur sortie) par des cellules de petite taille et  
 15 ensuite on insère des bords de mailles sur leur partie centrale qui est plus longue. Il n'est généralement pas utile d'affiner le maillage en entrée et en sortie en dehors des portions aux extrémités de chaque tronçon et l'on peut donc insérer sur une bonne part de la longueur de chaque tronçon (par exemple sur les  $\frac{2}{3}$  de la longueur) de la taille maximale que l'on s'est fixé.

20 Comme distribution, on peut choisir par exemple que la taille des mailles après celle qui suit un coude, augmente graduellement sur un tiers de la longueur du tronçon, reste constante sur le tiers suivant pour enfin diminuer graduellement sur le dernier tiers avant la maille courte finale comme le montre la Fig. 10.

### Définition des longueurs de cellules minimale et maximale

25 On va définir deux longueurs de cellules, une longueur minimale, qui va servir à isoler les bords de mailles imposés par des cellules de petites tailles, et une

longueur maximale, qui va servir à mailler les milieux des tronçons compris entre deux cellules courtes.

Toutes les mailles qu'on insère après ces deux étapes sont déduites des cellules initiales par interpolation entre une cellule courte et une cellule longue. Elles ont donc des tailles intermédiaires. Cette propriété est intéressante. Elle indique que le nombre de mailles total sera forcément compris entre le nombre qu'on aurait obtenu en maillant de façon homogène avec la longueur minimale, et le nombre obtenu de la même façon mais avec la longueur maximale. Ainsi, on peut contrôler le nombre de mailles total à partir des tailles minimale et maximale.

Une des contraintes du maillage automatique réside dans le nombre de mailles total. Celui-ci doit engendrer un temps de simulation le plus court possible, tout en permettant une bonne visualisation des phénomènes physiques. L'expérience montre d'une part qu'une discrétisation de moins de 40 mailles ne permet pas une bonne description physique des problèmes. D'autre part, les maillages de plus de 150 mailles engendrent des simulations trop longues. Le maillage par défaut doit donc être assez souple et comporter entre 40 et 100 mailles.

Un nombre de mailles aussi faible ne convient pas pour tous les cas. Le nombre de mailles idéal pour un cas précis dépend de plusieurs facteurs, entrant en compte dans le schéma numérique. A topographie égale par exemple, un cas comportant un grand nombre de changements de section nécessitera un maillage plus fin. La méthode selon l'invention laisse une grande latitude à l'utilisateur de choisir le nombre total de mailles qui lui convient.

A partir de ce nombre  $N$ , le code calcule les longueurs minimales  $Min$  et maximale  $Max$  de la façon suivante :

$$Min = \frac{L}{N + P}$$

$$Max = \frac{L}{N - P}$$

Le paramètre P permet de réduire l'écart entre les longueurs minimale et maximale de façon à rendre progressivement le maillage homogène pour les grands nombres de mailles.

- 5 On définit ce paramètre par exemple comme suit. Pour un nombre de mailles demandé inférieur ou égal à 60 par exemple, on le fixe par exemple à 60. C'est le maillage par défaut. Le paramètre vaut 40. La plus petite maille vaudra  $L/100$  et la plus grande  $L/20$ . Le nombre de mailles total sera compris entre 20 et 100.

- 10 Un nombre de mailles supérieur ou égal à 150 signifie que la modélisation à traiter est certainement plus délicate. Le but est alors de construire un maillage homogène. Pour cela, les tailles minimales et maximales doivent être proches l'une de l'autre. On va donc fixer le paramètre à 10. Le nombre de mailles total sera alors compris entre  $\frac{L}{N+10}$  et  $\frac{L}{N-10}$ . On obtient le nombre de mailles demandé, à 20 mailles près, sur plus de 150.

- 15 Pour faire en sorte que le maillage s'homogénéise progressivement entre 60 et 150 mailles, on va calculer le paramètre par interpolation linéaire entre les deux domaines, ce qui s'exprime de la façon suivante :

$$P=40 \text{ si } N < 60$$

$$P = -\frac{1}{3}N + 60 \text{ si } 60 < N < 150 \text{ et}$$

- 20  $P=10 \text{ si } N > 150$

Ce paramètre étant déterminé, il est possible d'isoler les bords imposés par des cellules courtes et de discrétiser les milieux des tronçons par des cellules longues.



Il ne reste plus qu'à trouver un moyen pour passer graduellement d'une cellule courte à une longue. On connaît les longueurs des trois cellules, et on cherche à insérer des bords de mailles sur la partie centrale. Les tailles des mailles ainsi créées doivent être comprises entre celles des cellules extrêmes. Partant de la plus petite, la  
 5 maille suivante doit toujours être plus longue que la précédente, mais plus courte que la suivante.

Dans le cas général, il n'existe aucun couple  $(f, n) \in (R, N)$  tel que :

- la taille d'une maille se déduit de celle de la précédente en la multipliant par un facteur  $f$ .
- 10 - la somme des  $n$  longueurs ainsi créées soit égale à  $(L_1 + L_2)$
- la taille de la dernière cellule puisse s'exprimer sous la forme  $f^{n+1} \cdot L_1$ .

Il en va de même pour une éventuelle interpolation linéaire entre les deux mailles. Le fait de connaître les trois longueurs impose une surabondance de données par rapport aux inconnues. Il est alors impossible de satisfaire toutes les contraintes.

15 Pour pallier cette difficulté, on propose une méthode de type géométrique où l'on utilise la propriété que les segments  $L_1, L_2, L_3, L_4$  découpés sur un axe par les droites d'un faisceau régulier (d'écartement angulaire  $\alpha$  constant les unes par rapport aux autres) dont le sommet est en dehors de cet axe, varient progressivement (Fig. 11).

20 On considère (Fig.12) un tronçon de conduite commençant par une petite maille  $(0, x_1)$  de longueur  $L_1$  et se terminant par une maille  $(x_2, x_3)$  de longueur  $L_3 > L_1$ . On peut montrer qu'il existe un point sur une perpendiculaire au tronçon de conduite à l'abscisse 0 tel que les mailles de longueurs  $L_1$  et  $L_3$  soient vues de ce point sous le même angle  $\alpha$ . L'ordonnée  $y$  de ce sommet est donné par la relation :

25 
$$y = \sqrt{\frac{L_1(L_1 + L_2)(L_1 + L_2 + L_3)}{(L_3 - L_1)}}$$

où  $L_2$  est la longueur du segment  $(x_1, x_2)$ .

Il s'agit ensuite de couper l'angle  $\beta$  en  $N$  parties égales,  $N$  étant égal à la division entière de  $\beta$  par  $\alpha$ , soit  $N = E(\frac{\beta}{\alpha})$ . Chacun des  $N$  angles découpant  $\beta$  est toujours supérieur ou égal à  $\alpha$ .

- 5 Le principe utilisé pour réaliser l'insertion des bords de mailles est à la fois simple et souple. Il permet, par le biais d'un unique paramètre, de créer un maillage soit uniforme, soit hétérogène affiné aux endroits importants.

## REVENDICATIONS

1) Méthode de maillage automatique de conduites permettant l'implémentation de codes de modélisation de fluides acheminés par ces conduites, caractérisée en ce que, ayant défini une taille minimale de maille et une taille maximale de maille, on subdivise la conduite en tronçons délimités par des coudes, on positionne une maille de taille minimale de part et d'autre de chaque coude, on positionne des grandes mailles de taille au plus égale à la taille maximale dans la portion centrale de chaque tronçon, et on répartit des mailles de tailles croissantes ou décroissantes sur les portions intermédiaires de chaque tronçon entre chaque maille de taille minimale et la portion centrale.

2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on répartit des mailles de tailles croissantes ou décroissantes sur les portions de chaque tronçon intermédiaire entre chaque maille de taille minimale et la portion centrale en déterminant les points d'intersection avec chaque tronçon de conduite, d'un faisceau de droites concourant en un point et formant entre elles un angle constant.

3) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on détermine la position du sommet du faisceau de droites sur un axe passant par un coude de la conduite et perpendiculaire à chaque tronçon, à une distance (y) de celui-ci qui est fonction de la taille (L'1, L'3) des mailles extrêmes de chaque portion intermédiaire et de leur écart (L'2).

4) Méthode de maillage selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce qu'elle comporte une simplification préalable de la typographie de la conduite.

5) Méthode de maillage selon la revendication 4, caractérisée en ce qu'elle comporte une représentation de la conduite sous la forme d'un graphe reliant l'abscisse curviligne et la variation de niveau, et une simplification du nombre de tronçons en affectant à chaque point entre deux tronçons successifs un poids prenant en compte la longueur (L1, L2) des tronçons et leurs pentes respectives (P1, P2) et en

sélectionnant parmi les points rangés par ordre de poids croissant ou décroissant, ceux dont le poids est le plus élevé.

5 6) Méthode de maillage selon la revendication 5, caractérisée en ce l'on sélectionne les points de la conduite dont le poids est le plus élevé en repérant dans le rangement de points une discontinuité de poids supérieure à un certain seuil fixé ( $\Delta P$ ).

10 7) Méthode de maillage selon la revendication 5, caractérisée en ce qu'elle comporte une représentation de la conduite sous la forme d'un graphe reliant l'abscisse curviligne et la variation de niveau, et une simplification du nombre de tronçons par la formation du spectre de fréquence de la courbe représentative de la topographie de la conduite, l'atténuation des plus hautes fréquences du spectre traduisant les plus petites variations de topographie et la reconstruction d'une topographie simplifiée correspondant au spectre de fréquence rectifié.

15 8) Méthode de maillage selon la revendication 7, caractérisée en ce qu'elle comporte un échantillonnage de la courbe représentative de la topographie de la conduite avec un pas d'échantillonnage choisi pour que le plus petit tronçon de la conduite contienne au moins deux pas d'échantillonnage, une détermination du spectre de fréquence de la courbe échantillonnée par application, une correction du spectre par filtrage passe-bas dont la fréquence de coupure est choisie en fonction  
20 d'un nombre de mailles maximal fixé pour subdiviser la conduite, et la détermination de la topographie correspondant au spectre de fréquence rectifié.

## REVENDICATIONS

1) Méthode de maillage automatique de conduites permettant l'implémentation de codes de modélisation de fluides acheminés par ces conduites, caractérisée en ce que, ayant défini une taille minimale de maille et une taille maximale de maille, on subdivise la conduite en tronçons délimités par des coudes, on positionne une maille de taille minimale de part et d'autre de chaque coude, on positionne des grandes mailles de taille au plus égale à la taille maximale dans la portion centrale de chaque tronçon, et on répartit des mailles de tailles croissantes ou décroissantes sur les portions intermédiaires de chaque tronçon entre chaque maille de taille minimale et la portion centrale.

2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on répartit des mailles de tailles croissantes ou décroissantes sur les portions de chaque tronçon intermédiaire entre chaque maille de taille minimale et la portion centrale en déterminant les points d'intersection avec chaque tronçon de conduite, d'un faisceau de droites concourant en un point et formant entre elles un angle constant.

3) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on détermine la position du sommet du faisceau de droites sur un axe passant par un coude de la conduite et perpendiculaire à chaque tronçon, à une distance ( $y$ ) de celui-ci qui est fonction de la taille ( $L1$ ,  $L3$ ) des mailles extrêmes de chaque portion intermédiaire et de leur écart ( $L2$ ).

4) Méthode de maillage selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisée en ce qu'elle comporte une simplification préalable de la topographie de la conduite.

5) Méthode de maillage selon la revendication 4, caractérisée en ce qu'elle comporte une représentation de la conduite sous la forme d'un graphe reliant l'abscisse curviligne et la variation de niveau, et une simplification du nombre de tronçons en affectant à chaque point entre deux tronçons successifs un poids prenant en compte la longueur ( $L1$ ,  $L2$ ) des tronçons et leurs pentes respectives ( $P1$ ,  $P2$ ) et en

PL I-7

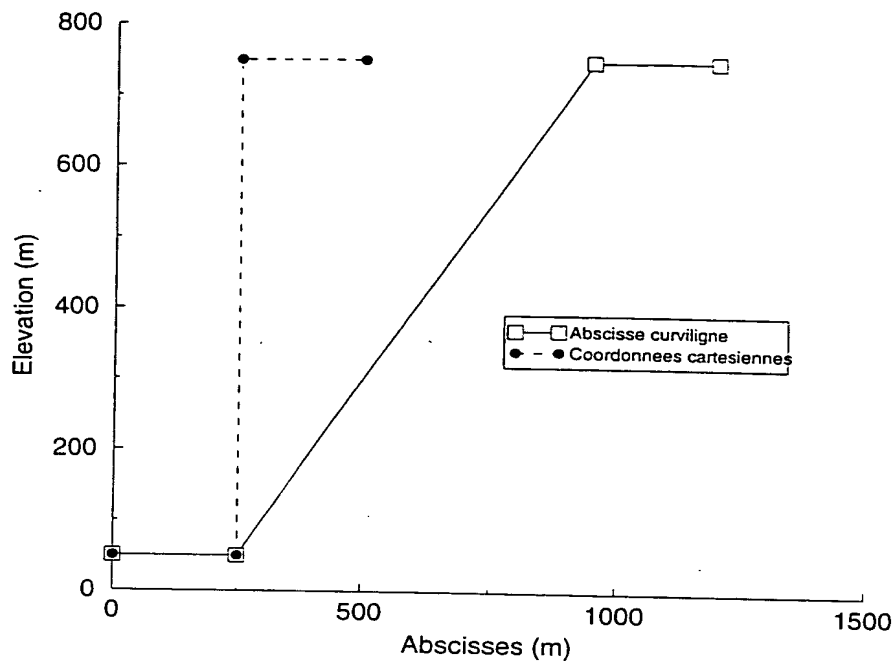


Fig. 1

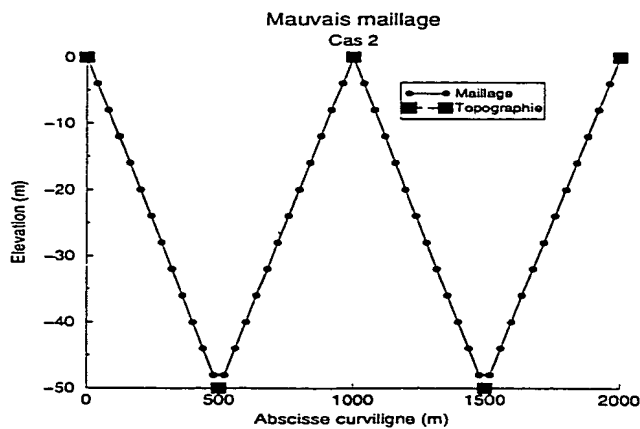


Fig. 2a

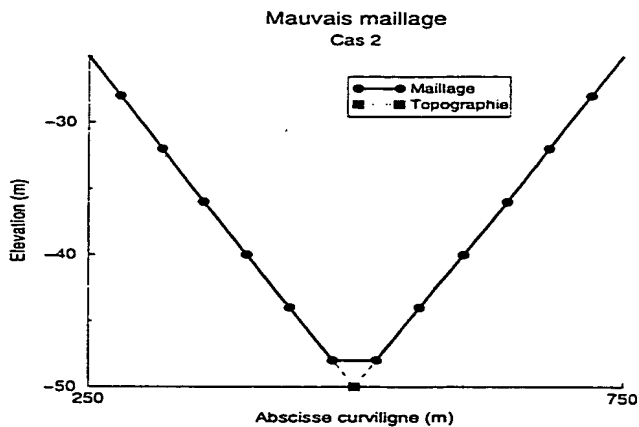


Fig. 2b

PL II -7

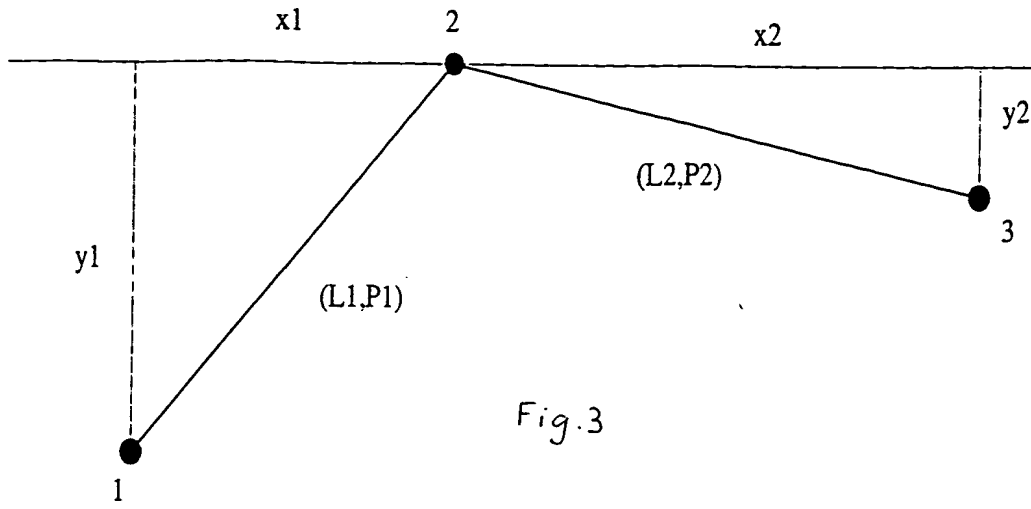


Fig.3

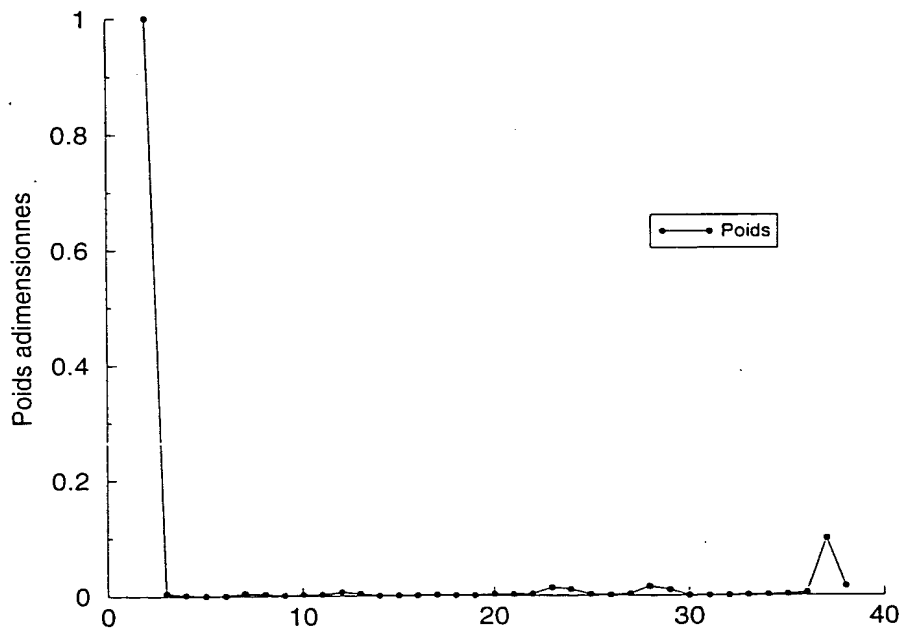


Fig.4

PL III-7

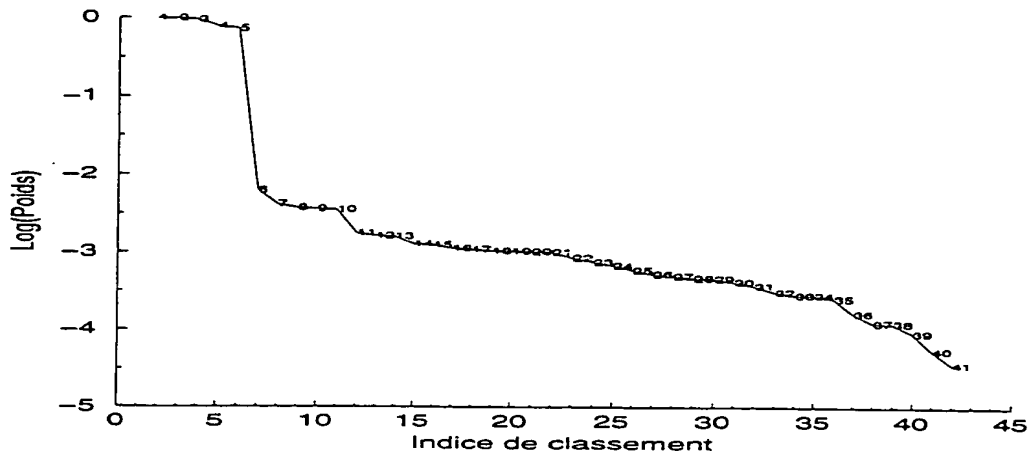


Fig. 5

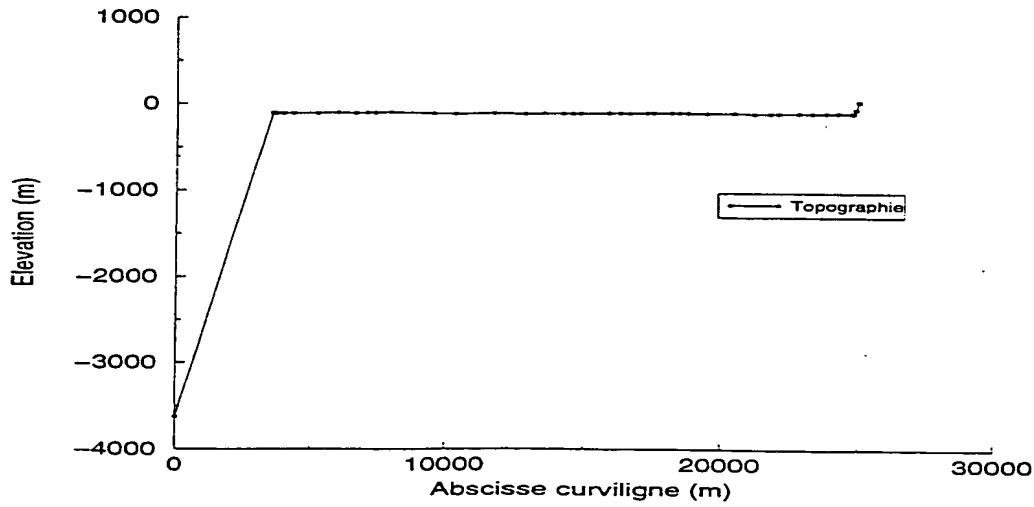


Fig. 6



PL IV-7

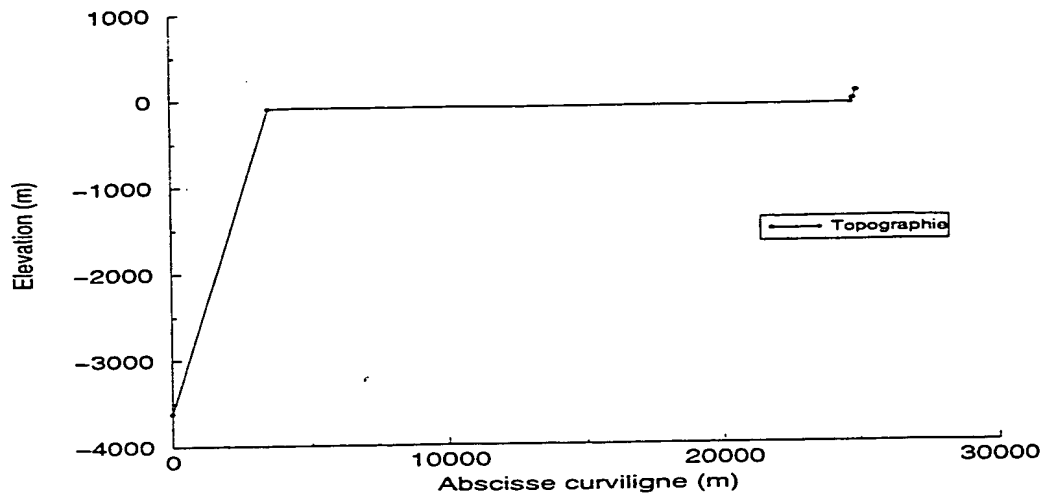


Fig.7

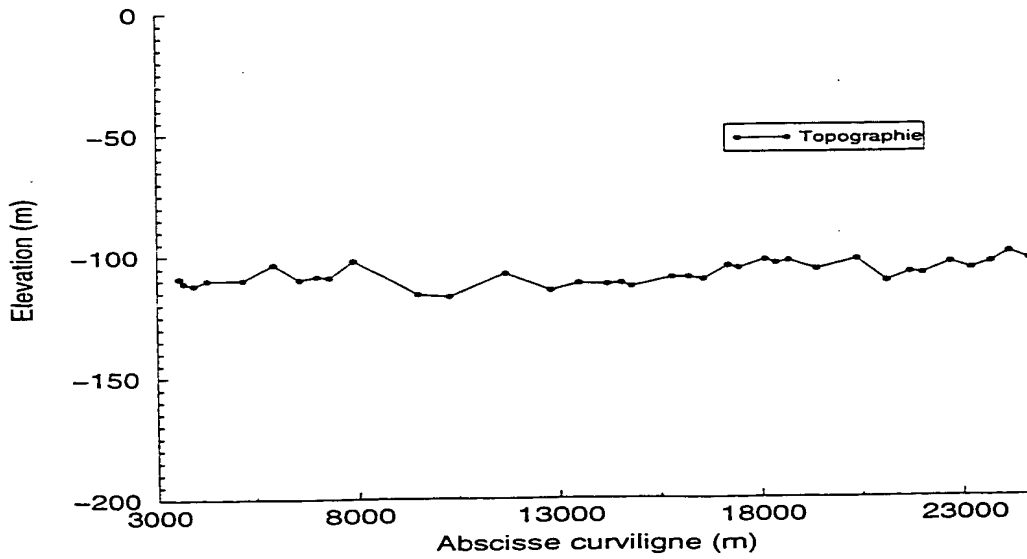


Fig.8

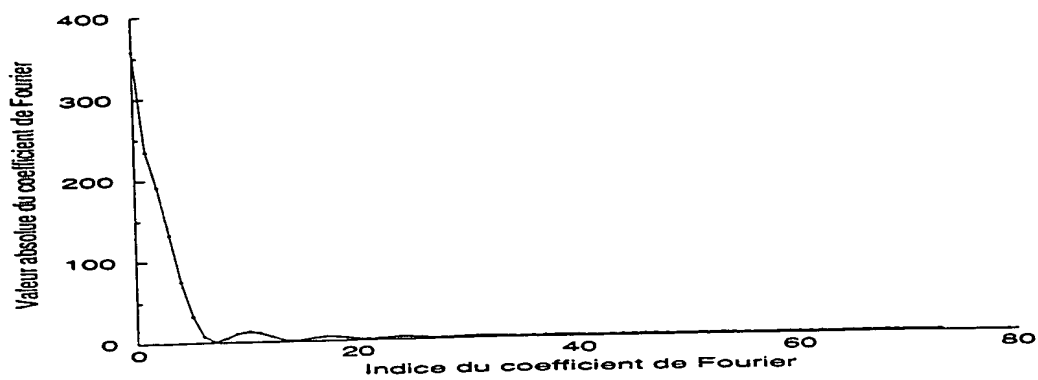


Fig. 9

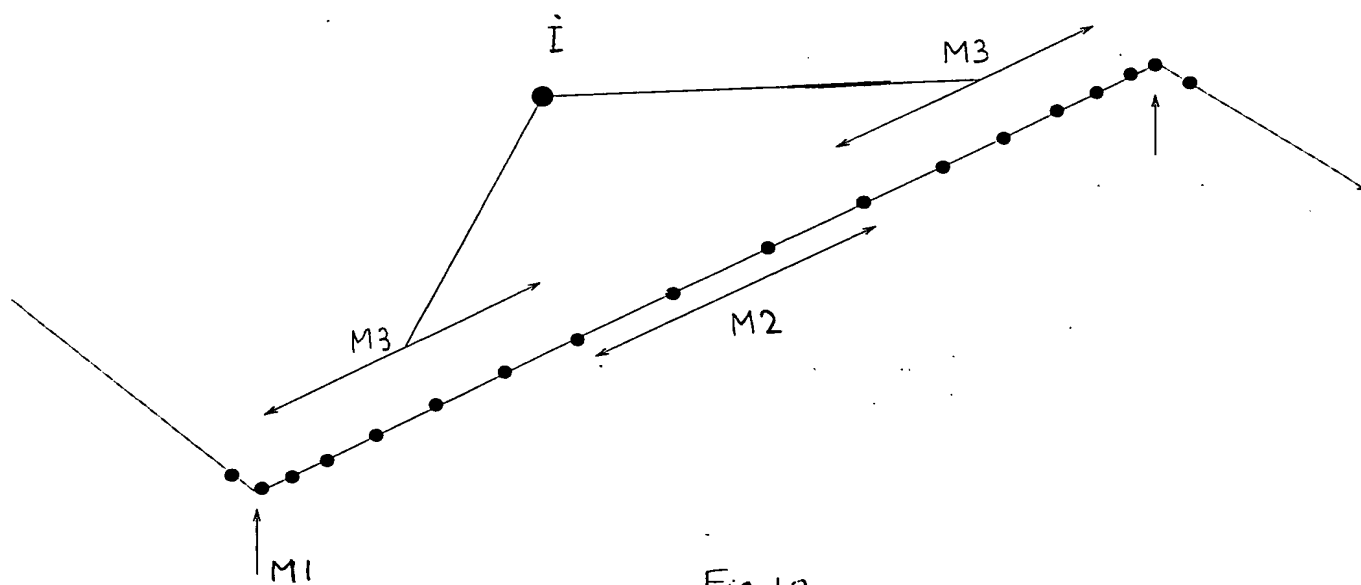


Fig. 10

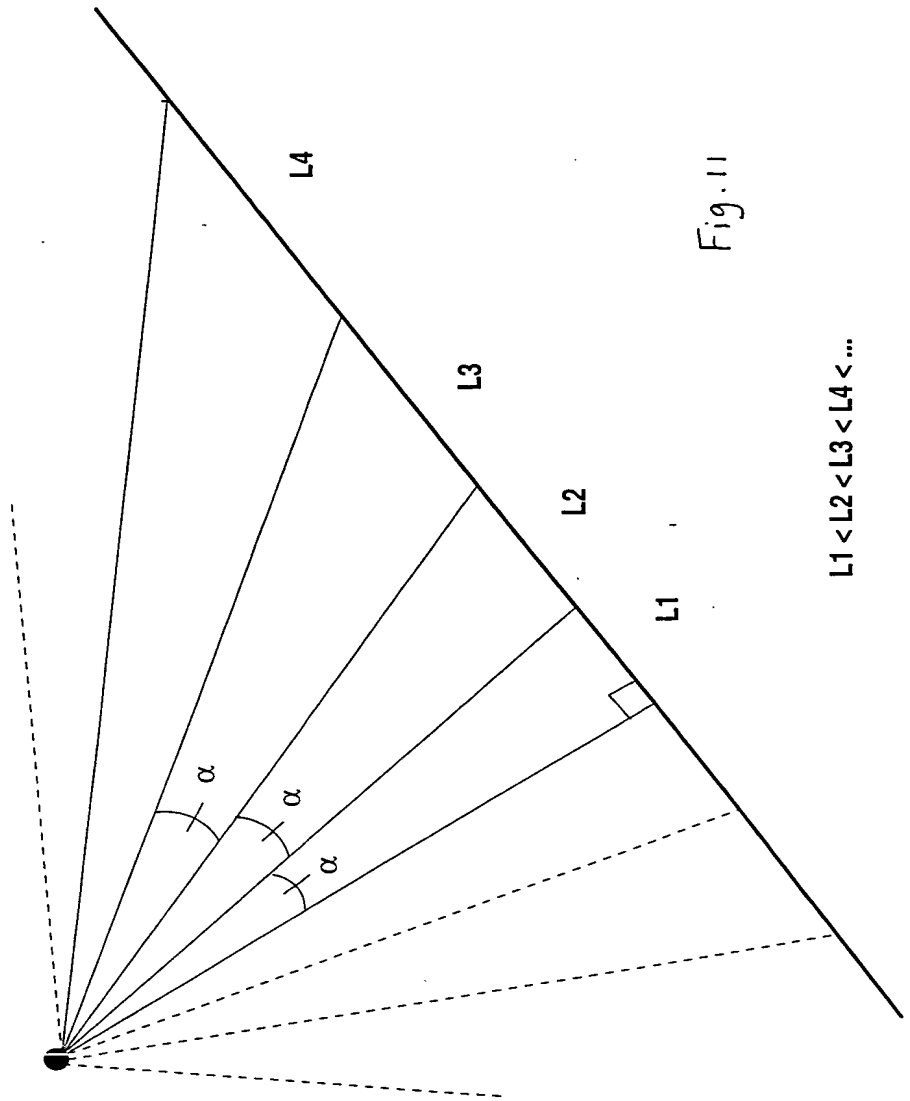


Fig. 11

$$L_1 < L_2 < L_3 < L_4 < \dots$$

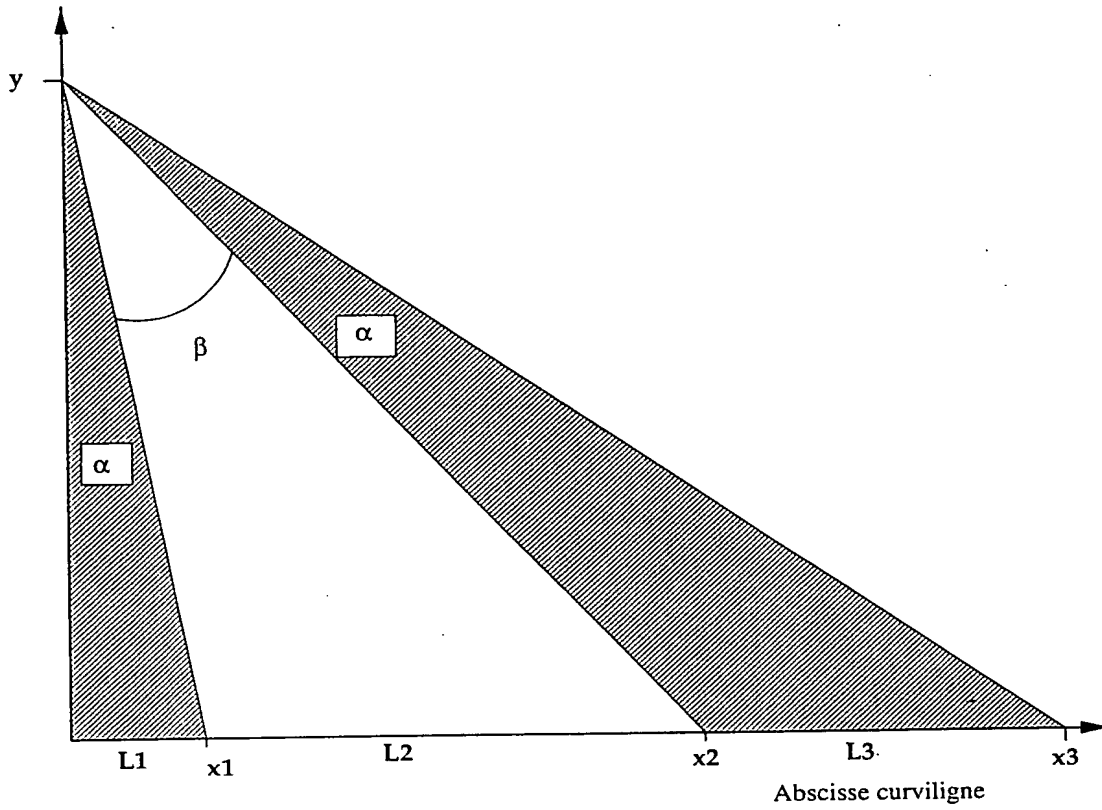


Fig.12

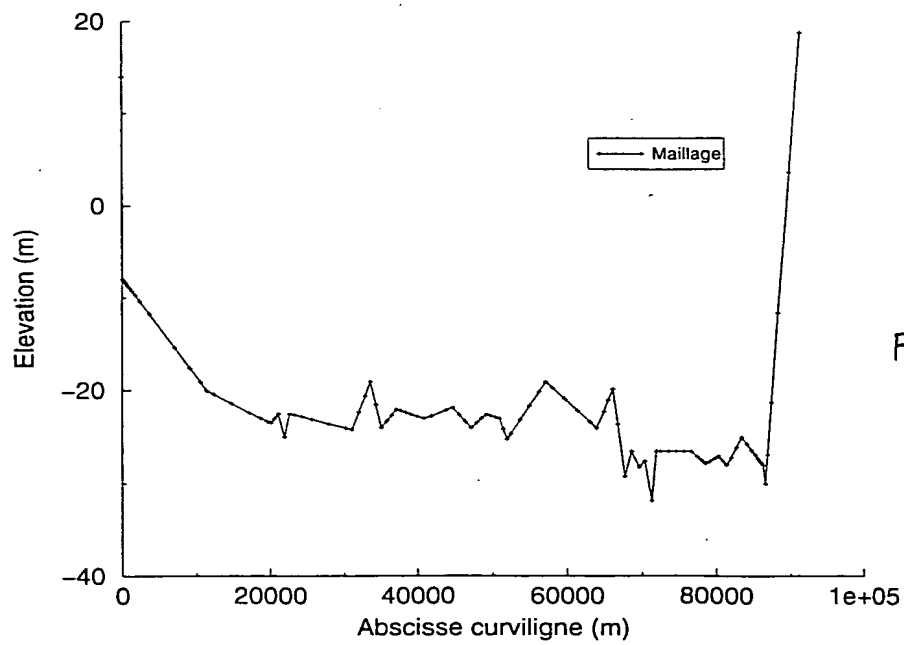


Fig.13